

## 연구용원자로에서 수조수관리계통 운전에 따른 수조수 온도 해석

최정운\* · 이선일\*\*† · 박기정\* · 서경우\*

\* 한국원자력연구원 연구로계통설계부, \*\* 한국원자력연구원 열수력·중대사고안전연구부

### Analysis on Pool Temperature Variation along Pool Water Management System Operation in Research Reactor

Jungwoon Choi\*, Sunil Lee\*\*†, Ki-Jung Park\*, and KyoungWoo Seo\*

\* Research Reactor System Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute,

\*\* Thermal Hydraulic and Severe Accident Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received July 28 2017; Revised August 31, 2017; Accepted October 1, 2017)

**Key Words:** Pool Water Management System(수조수관리계통), Open-Pool(개방형 수조), Research Reactor(연구용 원자로), Pool Cooling(수조 냉각), Pool Temperature(수조 온도)

**초록:** 국내 유일의 연구용원자로인 하나로(Hi-flux Advanced Neutron Application ReactOr)는 다목적으로 중성자를 이용하기 위해 개방형 수조 내 노심이 존재하는 구조이며, 노심에서 발생하는 핵분열 열을 제거하기 위한 일차 냉각계통, 그리고 연결된 유체계통이 구비되어 있다. 원자로 수조 상부 근방에서 진행되는 방사성 작업 시 작업자의 방사능 피폭을 최소화하기 위해 수조고온층계통에 의해 상부에 고온층이 형성되어 있으며, 다소 저온 영역에 있는 방사능 가스 및 이물질이 상부로 올라오는 것을 방지하기 위해 수조수 온도를 50°C이하로 제한하고 있으며 이를 위해 수조수관리계통이 연결되어 있다. 수조수관리계통의 구비된 관형열교환기의 열용량을 정상운전 조건에서 260 kW가 되도록 설계하여 각 수조에서 발생하는 열원을 제거하는지에 대해 평가하였고, 원자로 운전 모드와 관계없이 정상적으로 유체계통이 운전된다면 각 수조의 수조수 온도는 제한치 이하를 유지하고 있음을 확인하였다.

**Abstract:** The domestic unique research reactor, HANARO (Hi-flux Advanced Neutron Application ReactOr), has been constructed with the open-pool, the core is submerged in, for the multi-purpose neutron application. The reactor has a primary cooling system to remove the fission heat from the core and its connected fluidic systems. Since the works are required at the reactor pool top as a characteristic of the research reactor, the radiation shall be minimized with the operation of the hot water layer system to avoid unnecessary radiation exposure on the workers during work at the pool top. Moreover, the pool water management system is connected to the reactor pool to maintain the pool temperature below 50°C to minimize the uprising radioactive gas or impurity from the colder pool bottom. For the efficient flow rate of the PWMS, the thermal capacity of heat exchanger is selected with 260 kW in the normal operation condition. In this paper, the modeling is formulated to figure out whether or not each pool temperature maintains below the temperature limit and the calculation results show that the designed PWMS heat exchanger has enough capacity with the design margin regardless of the reactor operation mode.

## 1. 서론

### 1.1 연구용원자로 하나로

국내 유일의 연구용 원자로인 하나로(HANARO, Hi-flux Advanced Neutron Application Reactor)는 1985

† Corresponding Author, sunillee@kaeri.re.kr

년부터 1995년까지 국내에서 처음으로 자력으로 설계 및 건조하였으며 2004년에 최대 열중성자속  $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>·sec을 생산할 수 있는 설계 열출력인 30 MW 운전에 도달하였다. 1995년 초기 임계에 도달하였을 당시에는 원자로 본체만을 갖추어 하나로가 가질 수 있는 성능의 극히 일부분 활용을 위해 운전하였으나, 지속적인 연구개발 및 지원에 의해 Fig. 1과 같이 하나로 이용시설을 구축하였으며 이로 인해 첨단 원천기술 개발의 기반을 제공하고 있다.<sup>(1~3)</sup> 하나로는 이러한 중성자 빔 이용연구, 재료 조사 시험, 동위원소 생산 등 연구로의 주요 이용분야를 대부분 수용할 수 있는 다목적 연구로이기 때문에, 전력생산을 위한 상용로와는 설계에서부터 많은 차이를 두고 있다. 이용설비 활용을 최적화시키기 위해 원자로 노심이 위치하는 원자로 수조는 개방형으로 설계되었다. 또한 비정상 상태 발생 시 고유 안전성을 확보하기 위해 충분한 열 제거원 이자 원자로의 방사능 차폐체로 약 10m 정도의 수위를 확보할 수 있도록 원자로 수조를 설계하였으며, 이용설비 이용 및 작업 편의성을 위해 원자로 수조와 연결된 작업수조가 구비되어 있다.

연구용 원자로의 출력 운전을 위해서는 원자로 노심에서 발생하는 열을 적절하게 제거하기 위한 일차냉각계통(PCS, Primary Cooling System), 항상 개방되어 있는 원자로 수조와 작업수조에 충수된 냉각수 이자 수조수의 수질을 관리하기 위한 수조수관리계통(PWMS, Pool Water Management System), 노심에서 생성되는 고속중성자를 열중성자로 감속시키기 위한 반사체인 중수(heavy water)를 냉각 및 순환시키기 위한 중수계통(HWS, Heavy Water System), 수조상부 작업자의 피폭을 최소화하기 위해 열성층화를 이용한 수조 상부 고온층 형성을 위한 수조고온층계통(HWLS, Hot Water Layer System), 일차냉각계통의 냉각수를 냉각시키기 위한 이차냉각계통(SCS, Secondary Cooling System)이 정상적으로 가동되어야 한다. 원자로가 출력 운전 시, 노심에서 발생하는 열은 PCS에 의해 제거되어 원자로 수조수의 온도는 PCS의 일차냉각수의 노심 유입 온도로 수렴되며, 수조수 온도를 제어하기 위한 별도의 냉각계통 운전이 필요하지는 않다. 그러나 원자로가 정지된 후 PWMS가 설계기준에 부합하는 운전을 하지 못하면, 핵연료 속에 있는 핵분열 생성물의 붕괴로 발생하는 열인 붕괴열이 적절히 제거되지 않아 원자로 수조수의 온도는 점진적으로 증가하게 된다.

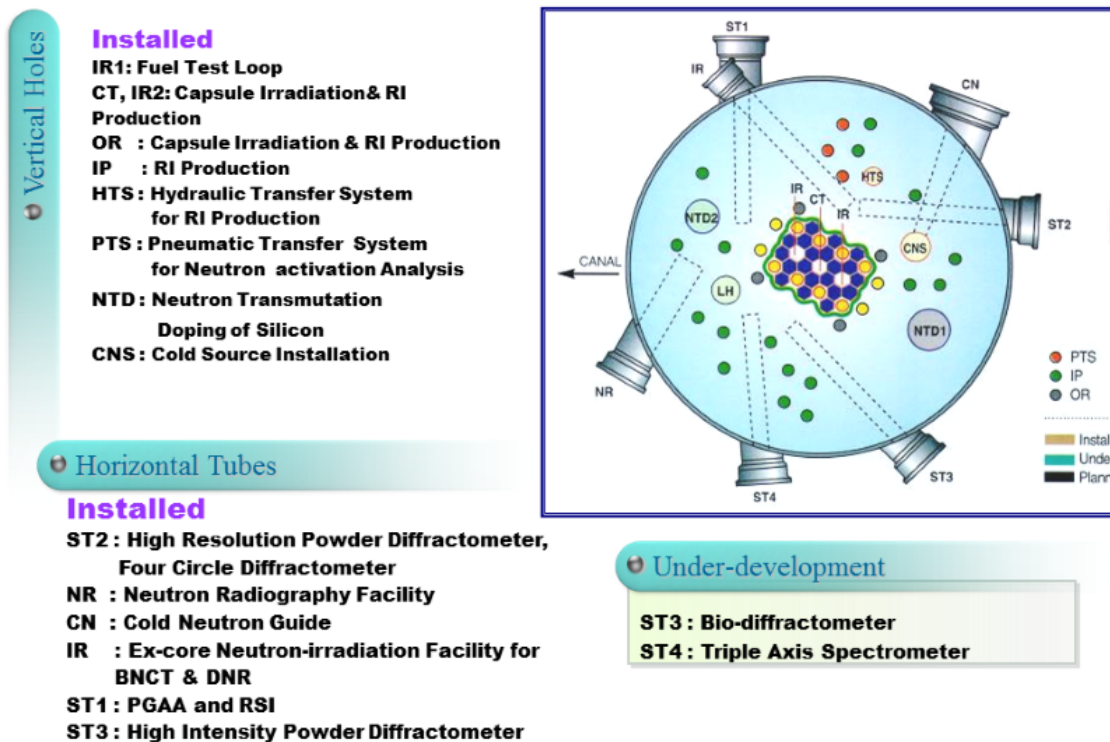


Fig. 1 Beam Ports and irradiation holes at the multi-purpose research reactor, HANARO

개방형 수조에 원자로 노심이 잠겨 있는 경우 수조수 온도가 50℃ 이상으로 증가하게 되면, 수조수 내에 녹아 있던 방사성 물질인 수용성 핵종 Na-24와 비활성기체 Ar-41가 가스 상으로 분리되고 수조 상부로 올라오게 됨에 따라 수조 상부 방사성 준위가 높아지게 된다. 이를 방지하기 위해 원자로가 정지된 상태에서는 PWMS를 항시 운전하여 수조수 정화는 물론 수조 내 붕괴열을 포함한 발열량을 제거하기 위한 냉각 기능을 수행하여 수조수 온도를 설계기준 이하로 유지해야 한다. 즉, PWMS는 원자로 정지 상태 또는 유지보수 상태에서 요구되는 열량을 적절히 제거하여 수조수 온도를 기준 이하로 유지될 수 있도록 효율적인 설계가 요구된다. 따라서 본 논문의 목적은 PWMS에 구비된 판형 열교환기의 열용량을 효율적으로 산정하여 각 수조에서 발생하는 열원을 적절히 제거하여 설계 기준 이하로 유지하는 지를 확인하는 데 있다.

## 2. 모델링

### 2.1 시스템 모델링

PWMS는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 원자로 수조, 작업수조, 그리고 사용후 핵연료 저장조의 냉각과 정화 요건을 만족시키기 위해 설계되어 있으며, 각 수조의 수조수를 정화하기 위해 방사성 물질을 제거하기 위한 필터와 방사성 이온입자를 제거하기 위한 이온교환기가 설치되며, 각 수조에서 발생하는 열량을 제거하기 위한 판형 열교환기가 구비되어 있다. 각 수조는 Table 1과 같이 모델링 하였고, 온도 특성을 해석하기 위한 본 논문에서는 이온교환기는 모델링하지 않고, PWMS 열교환기인 판형 열교환기만 모델링 하였다.

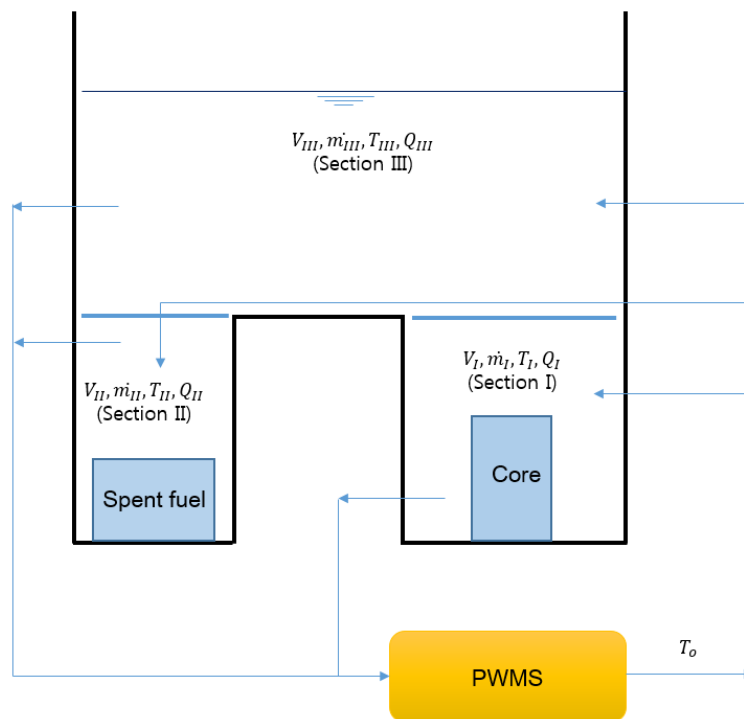


Fig. 2 Geometry of the pool connected to the PWMS

**Table 1** Pool geometry and process parameters used in modeling

Volume	Reactor Pool (Section I)	160 m <sup>3</sup>
	Spent Fuel Storage Pool (Section II)	60 m <sup>3</sup>
	Upper pool (Section III)	360 m <sup>3</sup>
Each Section Flow Rate in PWMS	Reactor Pool (Section I)	9.8 kg/s
	Spent Fuel Storage Pool (Section II)	4.7 kg/s
	Upper pool (Section III)	3.5 kg/s

**Table 2** Estimated heat sources in the pools

Heat Sources	Heat load [kW]	Note
Decay heat from the core at 2 hours after the reactor shutdown	-0.0025t + 345	PCS operation for 2 hours after reactor shutdown
Decay heat from one full core	145	at 24 hours after reactor shutdown
Irradiated objects	35	Always
Transferred from hot water layer	5	Always
Decay heat from spent fuels	75	Always

원자로 출력 운전동안, PWMS 열교환기는 보조 수조에 보관되어 있는 조사물체들과 사용후 핵연료 저장조에 저장된 사용후 핵연료에서 나오는 붕괴열을 열량을 제거하는 역할을 한다. 원자로가 정지하게 되면, 노심에서 나오는 핵분열 열은 급격히 작아지더라도 원자로 정지 직후의 붕괴열은 PWMS에 설계된 열교환기에서 제거하기에는 상당히 큰 열량이다. 붕괴열은 지수적으로 시간이 지남에 따라 급격하게 감소하는 특성을 가지고 있기 때문에, 원자로 정지 직후의 붕괴열을 기준으로 PWMS의 요구 냉각유량을 설계하는 것은 효율적인 설계라고는 볼 수 없다. 이러한 관점을 고려하여 원자로 운전 상태와는 상관없이 원자로 수조수 온도를 50℃ 이하로 유지하면서 각 수조수의 열량을 제거할 수 있도록 정상 출력 운전 조건에서 PWMS 열교환기 열용량을 260 kW가 되도록 설계하였다. 상세한 열교환기 모델링은 2.2 절에 기술하였다.

위와 같이 고려한 열교환기의 열용량이 모든 원자로 운전모드에 상관없이 적절인지에 대한 평가가 필요하다. 각 수조는 물리적으로 working platform에 의해 세 개의 영역으로 나뉜다. 첫 번째 영역은 원자로 노심이 존재하는 원자로 수조 하부(Section I), 두 번째 영역은 사용후 핵연료가 저장되어 있는 영역(Section II), 그리고 마지막 영역은 수조상부 영역(Section III)이다. PWMS는 이런 세 개의 영역에서 각각 일정 유량을 가져와서 냉각과 정화를 한 후, 다시 동일 유량으로 각 수조에 공급하게 된다. 즉, 각 수조에 연결된 PWMS 유입/유출배관을 통해 순환되는 유체에 의해 각 수조에서 온도 변화가 발생되므로, 각 수조에서의 온도변화는 식 (1)~(3)으로 수식화될 수 있다. 여기서 각 수조 영역에서 고려된 열 발생원은 Table 2와 같다.

$$\rho V_I C_p \frac{dT_I}{dt} = \dot{m}_I C_p (T_{1,o} - T_I) + Q_I \text{ for Section I} \quad (1)$$

$$\rho V_{II} C_p \frac{dT_{II}}{dt} = \dot{m}_{II} C_p (T_{1,o} - T_{II}) + Q_{II} \text{ for Section II} \quad (2)$$

$$\rho V_{III} C_p \frac{dT_{III}}{dt} = \dot{m}_{III} C_p (T_{1,o} - T_{III}) + Q_{III} \text{ for Section III} \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 수조수 온도  $T$ 에서의 밀도,  $V$ 는 각 수조의 부피,  $C_p$ 는 수조수  $T$ 와  $T_{1,o}$ 의 평균온도에서의 열용량,  $\dot{m}$ 은 각 수조의 냉각유량,  $T_{1,o}$ 는 PWMS 열교환기의 출구온도, 그리고  $Q$ 는 각 수조에서 발생하는 열원이다.<sup>(4)</sup>

## 2.2 열교환기 모델링

PWMS의 열교환기는 판형열교환기로 설계되었다. 판형열교환기 용량은 식 (4), (5)와 같이 PWMS 유량( $\dot{m}_1$ ), SCS 유량( $\dot{m}_2$ ), PWMS 입/출구온도( $T_{1,i}$ ,  $T_{1,o}$ ), SCS 입/출구온도( $T_{2,i}$ ,  $T_{1,o}$ ), 열교환 면적( $A_{plate}$ ), 총괄열전달계수( $U_{plate}$ )의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m}_1 C_{p,1} (T_{1,i} - T_{1,o}) \\ &= \dot{m}_2 C_{p,2} (T_{2,o} - T_{2,i}) \\ &= U_{plate} A_{plate} (LMTD) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{where, } T_{1,i} = \frac{\dot{m}_I T_I + \dot{m}_{II} T_{II} + \dot{m}_{III} T_{III}}{\dot{m}_I + \dot{m}_{II} + \dot{m}_{III}}$$

$$\begin{aligned} LMTD &= \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (\Delta T_1 \neq \Delta T_2) \\ &= \Delta T_1 = \Delta T_2 \quad (\Delta T_1 = \Delta T_2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{where, } \Delta T_1 = T_{1,i} - T_{2,o}, \Delta T_2 = T_{2,o} - T_{1,i}$$

판형열교환기의 열전달 성능을 좌우하는 총괄열전달계수는 식 (6)의 상관관계식을 사용하였으며, 이는 판형열교환기에서 가장 일반적으로 사용되는 관계식<sup>(5)</sup>이며, Fig. 3과 같이 기하학적 변수를 포함하는 함수이다. 본 논문에서는 Fig. 3에 나타난 정상상태 조건에서 260kW가 되도록 각 기하학적 값( $D_p$ ,  $N_t$ ,  $N_p$ ,  $b$ ,  $L_p$ ,  $L_v$ ,  $L_h$ )들을 선정하였으며, 그 값들은 보안의 이유로 본 논문에서 제시하지는 않았다.

$$\begin{aligned} Nu &= (0.2668 - 0.006967\beta + 7.244 \times 10^{-5}\beta^2) \\ &\quad \times (20.78 - 50.94\phi + 41.1\phi^2 - 10.51\phi^3) \\ &\quad \times (Re^{1/2} Pr^{1/3}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{where, } c = 0.728 + 0.0543 \sin \left[ \left( \frac{\pi\beta}{45} \right) + 3.7 \right],$$

$$\phi = \frac{A_{plate}}{(L_v - D_p)(L_h + D_p)}, Re = \frac{G_c D_h}{\mu}, Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$G_c = \frac{m}{N_{cp} b L_w}, N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2N_p}, D_h = \frac{2b}{\phi}$$

- $N_t$  : number of plates,  $N_p$  : number of passes
- $b$  : channel width,  $D_p$  : port diameter
- $L_p$  : vertical distance between the ports
- $L_v$  : vertical distance between the port centers
- $L_h$  : horizontal distance between the port centers

### 3. 결과

원자로가 기동 또는 출력운전 중에는 항상 PCS가 기동되어 원자로 노심에서 발생하는 핵분열 열을 제거하여 Section I에서의 온도는 PCS에 의해 냉각되어 노심으로 유입되는 유체 온도에 의해 결정되기 때문에, 출력운전 모드에서의 온도 변화는 본 지에서 다루지 않았다. 이에 따라 PWMS의 냉각 기능이 요구되는 원자로 운전 모드는 원자로 정지 모드와 유지보수 모드로 각 운전 모드에 따라 각 수조의 온도변화를 도출하였다.

#### 3.1 원자로 정지 모드에서의 각 수조 내 수조수 온도 변화

각 수조에서의 수조수 온도를 계산하기 위한 각 값은 보수적인 결과를 도출하기 위해 다음과 같이 가정을 하였다. 붕괴열은 시간이 지남에 따라 지수 적으로 감소하나, 본 계산에서는 원자로 정지 후 2시간의 붕괴열과 24 시간에서의 붕괴열을 내삽 하여 적용하였다. 또한 수조수의 초기 온도는 PCS가 운전 중일 때, 원자로 내로 유입되는 온도에 지배되거나 원자로에서 유출되는 온도도 고려하여 온도 변화 양상에 대해 알아보았다.

원자로 정지 모드에 돌입한 후 2 시간 동안 PCS 운전을 지속시킨 후 멈추었을 때, 각 수조에서의 시간에 따른 수조수 온도 변화를 Fig. 4 와 Fig. 5에 나타내었다. 초기 조건으로 수조온도를 PCS내로 유입 온도(42.7°C)로 가정하였을 때, 각 수조의 모든 온도는 시간이 지남에 따라 감소하다가 일정온도에서 수

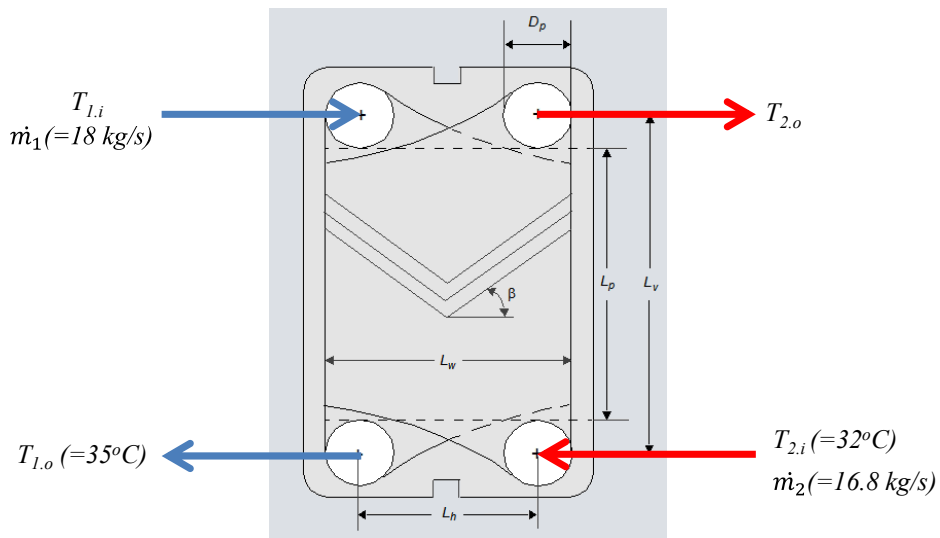


Fig. 3 Normal operating condition and Geometry of PWMS heat exchanger

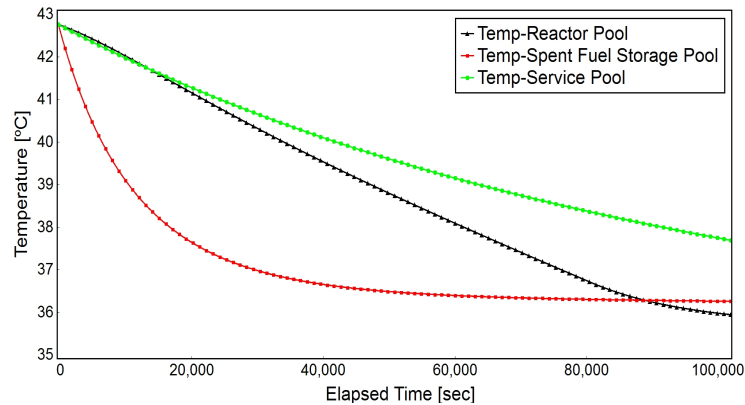


Fig. 4 Pool temperature variation at initial temperature of 42.7°C (shutdown mode)

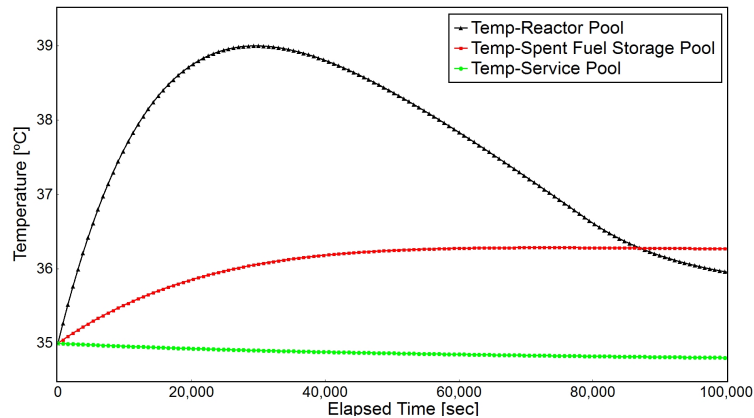


Fig. 5 Pool temperature variation at initial temperature of 35°C (shutdown mode)

렴하는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 초기조건으로 수조온도를 PCS에서 나오는 유출온도(35°C)로 고려하였을 때에는 사용후 핵연료 수조와 원자로 수조의 수조수 온도는 일시적으로 39°C까지 증가하였다가 감소하여 일정 온도에서 수렴하는 것으로 보여 진다. 원자로 정지 운전 모드에서 각 수조에서 발생하는 발열량은 현재 가정된 PWMS 열교환기 열용량에 의해 적절히 제거되어 수조수 온도 제한치(50°C) 아래에 있음을 확인하였다.

### 3.2 원자로 유지보수 시 각 수조 내 수조수 온도 변화

원자로 수조 내 작업을 수행할 때, 작업자의 불필요한 방사능 피폭을 최소화하기 위해 원자로 수조 내 삽입된 핵연료를 인출하여 사용후 핵연료 저장조에 보관되어야 한다. 사용되고 있는 핵연료는 일반적으로 원자로 노심에서 24시간 동안 냉각시킨 후 사용후 핵연료 저장조로 이송되므로 원자로 유지보수 동안에는 별도로 제거해야 되는 열원이 원자로 수조에는 없게 되므로 PWMS는 Section II와 Section III에서 냉각 유량을 일부 취하여 열교환기와 정화기기를 거쳐 다시 두 영역으로 유입된다. 이에 따라 원자로 수조에서의 온도 변화 양상도 더 이상 고려할 대상이 아니므로 계산에서 배제하였다. 또한 보다 보수적인 결과를 위해, 24시간 후 원자로 노심에서 발생하는 붕괴열은 지수 적으로 시간에 따라 감소하나 Table 1에 표기된 값을 일정하다고 가정하여 계산에 고려하였다.

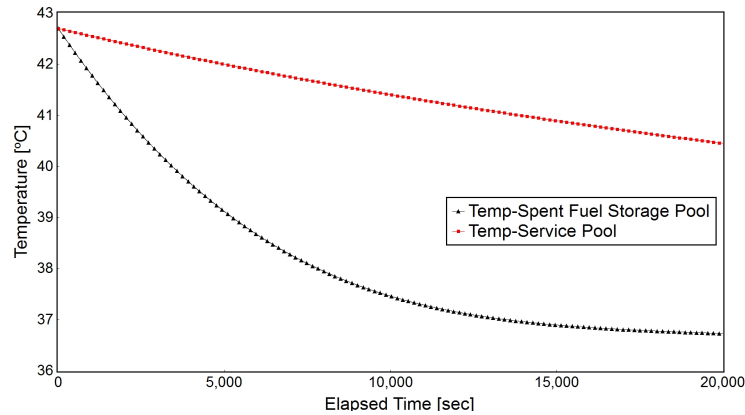


Fig. 6 Pool temperature variation at initial temperature of 42.7°C (maintenance mode)

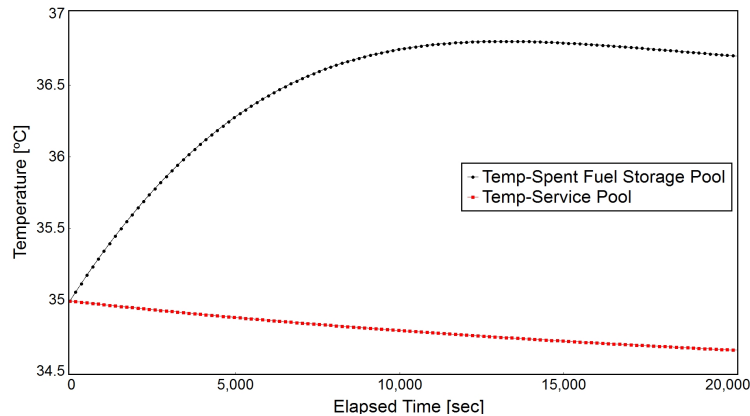


Fig. 7 Pool temperature variation at initial temperature of 35°C (maintenance mode)

원자로 수조 내 유지보수 작업 동안에 Section II와 Section III에서의 온도 변화는 PCS 내로 유입되는 유체 온도(42.7°C)를 수조수 온도로 가정하였을 때에는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 각 영역의 수조수 온도가 점진적으로 낮아지면서 일정한 값에서 수렴되는 것을 확인할 수 있다. 또한 계산 시 고려된 수조수 초기 온도를 PCS에서 냉각된 유체의 온도(35°C)를 수조수 온도로 가정하였을 때에는 사용후 핵연료 저장조(Section II)에서는 일시적으로 수조수 온도가 증가하는 경향을 나타내나 시간이 경과함에 따라 다시 감소하여 일정한 값에 수렴될 것으로 예측된다(Fig. 7). Section III에서 고려되는 발생되는 열원의 증가가 없기 때문에 원자로 정지 모드와 동일하게 수조수 온도가 소폭 감소되면서 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 원자로 수조 유지 보수 동안에도 원자로 정지 모드와 유사하게 각 수조에서 발생하는 발열량은 현재 가정된 PWMS 열교환기 열용량에 의해 적절히 제거되어 수조수 온도 제한치 아래에 있음이 확인된다.

#### 4. 결론

연구용원자로는 일반적으로 원자력 발전로와 달리 하나로처럼 중성자를 이용하기 위한 거대설비로써 출력량이 작고 다목적으로 활용하기 위해 개방형 수조로 설계된다. 이용 효율을 높이기 위해 개방형 수조 상부에서 원자로 운전 중에는 운전원 또는 방사성작업자가 작업을 수행하는 과정에서 불필요한 작업자의 방사능 피폭을 지양하기 위해 수조 상부는 수조고온층계통에 의해 하부 영역보다 약 10°C 정도 높



은 고온층을 형성시켜 하부의 방사성 가스 또는 이물질이 상부로 이동하지 못하도록 설계된다. 이를 만족시키기 위해 원자로 운전모드에 상관없이 원자로 수조수 온도는 50°C 이하로 유지시키기 위한 PWMS의 효율적인 설계가 요구된다. 본 논문에서는 PWMS에 구비된 판형열교환기의 열용량을 효율적으로 산정하여 각 수조에서 발생하는 열원을 제거하는지에 대해 평가하였다. 상기 계산 결과에 따라 원자로 운전모드와 관계없이 정상적으로 PWMS가 운전된다면 각 수조의 수조수 온도는 제한치 이하를 유지하고 있음을 보여줌에 따라 고려된 PWMS 판형 열교환기가 설계 여유도 내에 충분한 열용량을 가지고 있음이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 미래창조과학부에서 시행한 신성장동력 원자력 고유브랜드 개발 사업의 일환인 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과입니다.

## 참고문헌

- (1) Kang, H. and et al., 1998, Final report on “Review and Recommendation for the Maximum Utilization and Reasonable Management of the HANARO Reactor,” *Radiation Science Research Institute at Kyungpook National University*, MOST-326/98.
- (2) Lee, K. and et al., 2014, “Promotion of HANARO Utilization for Year 2013,” *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/TR-6680/2014.
- (3) HANARO Webpage “<http://hanaro.kaeri.re.kr:444/intro/sub01.do>.”
- (4) Choi, J. and et al., 2017, “Pool Cooling Evaluation in the Open-Pool Research Reactor,” *Transaction of the KNS Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 18-19.
- (5) Lee, S. and et al., 2016, “Design Guideline for Primary Heat Exchanger in a Research Reactor,” *Transaction of the KNS Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 12-13.